

همانطور که در بخش قبلی گفته شد؛ خوردگی انهدام، تخریب تدریجی یا دگرگونی در خواص و مشخصات مواد است که در اثر واکنش‌های شیمیایی یا الکتروشیمیایی این مواد با محیط اطرافشان حاصل می‌شود. [۱]

پدیده خوردگی بیشتر در فلزات و آلیاژها ظاهر می‌شود؛ زیرا اغلب فلزات و آلیاژها برای رسیدن به پایداری شیمیایی، تمایل به ایجاد ترکیب شیمیایی با اتم‌ها یا مولکول‌هایی از محیط اطراف خود دارند و فقط تعداد کمی از فلزات مانند طلا یا پلاتین وجود دارند که تحت شرایط معمولی پایدار بوده و تمایلی به واکنش دهی با محیط اطراف ندارند. همچنین مواد غیرفلزی مانند مواد سرامیکی و پلیمری تحت تأثیر واکنش‌های الکتروشیمیایی قرار نمی‌گیرند؛ اما در شرایطی، واکنش‌های شیمیایی می‌توانند به‌طور مستقیم روی این مواد تأثیرگذار باشند و موجب تخریب آن‌ها شوند.

مثال‌هایی از پدیده خوردگی که در زندگی روزمره مشاهده می‌شوند، عبارت‌اند از: خوردگی لوله‌های آب، خوردگی بدنه اتومبیل در هوای مرطوب، خوردگی شوفاژها با جریان آب گرم و خوردگی ماشین‌های تولید بخار و توربین‌های گازی. [۲]

انواع مختلفی از خوردگی وجود دارد که می‌توانند یک فلز را تحت تأثیر قرار دهند. از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. خوردگی یکنواخت^۱

۲. خوردگی حفره‌ای^۲

۳. خوردگی شکافی^۳

۴. خوردگی بین‌دانه‌ای^۴

۵. ترک خوردگی تنش^۵

در ادامه هر کدام از انواع خوردگی را به‌طور خلاصه بررسی می‌کنیم.

۱. خوردگی یکنواخت

متداول‌ترین نوع خوردگی، خوردگی یکنواخت است. در این نوع، واکنش الکتروشیمیایی یا شیمیایی به‌طور یکنواخت در سطح فلز یا آلیاژ گسترش می‌یابد و به‌مرور زمان سبب نازک‌تر شدن ماده در محیط خورنده و از بین رفتن آن می‌گردد. از آن‌جا که خوردگی یکنواخت قابل پیش‌بینی بوده و کنترل آن نسبتاً ساده است، موجب اعمال خسارات ناگهانی نمی‌شود.

برای جلوگیری از خوردگی یکنواخت از تدابیر حفاظتی سطح مانند رنگ‌آمیزی، پوشش‌دهی، آب‌کاری، روکش‌کاری یا روش‌های دیگر استفاده می‌شود.

^۱Uniform Corrosion

^۲Pitting Corrosion

^۳Crevice Corrosion

^۴Intergranular Corrosion

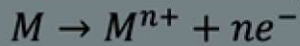
^۵Stress Corrosion Cracking



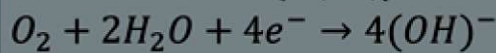
۲. خوردگی حفره‌ای

خوردگی حفره‌ای نوعی از خوردگی موضعی است که منجر به ایجاد حفره‌هایی در سطح فلز شده که با ادامه این فرایند، عمیق‌تر می‌شوند. این نوع خوردگی، بسیار مخرب است زیرا منجر به شکست یک قطعه، بدون کاهش وزن آن می‌گردد. [۱]

ناخالصی‌های غیرفلزی و ناهمگنی‌های ساختاری و شیمیایی در سطح فلز، نقاط مناسبی برای آغاز این نوع خوردگی و حفرات ناشی از آن هستند. واکنش آندی که در انتهای سطح حفره انجام می‌شود، به صورت زیر است (M نماد شیمیایی فلز است):



الکترون‌های آزاد شده از واکنش آندی همراه واکنش اکسیژن با آب، موجب واکنش کاتدی در سطح فلز و در مجاورت حفره ایجاد شده می‌شوند که به صورت زیر است:



بنابراین در حالت کاتدی، فلز در اطراف حفره از خوردگی حفظ می‌شود. با وجود عناصری مثل کلر در محیط، ترکیب MCl با آب واکنش داده و هیدروکسید فلزی و اسید تولید می‌کند:



بدین ترتیب غلظت اسیدی بالای انتهای حفره، سبب افزایش سرعت واکنش آندی می‌گردد. شناسایی خوردگی حفره‌ای اغلب مشکل است، زیرا تعداد و عمق حفره‌های ایجاد شده متفاوت بوده و ممکن است حفرات کوچک توسط محصولات خوردگی پوشانده شوند. در نتیجه، این نوع خوردگی سبب شکست‌های غیرمنتظره قطعات شده و ارزیابی خسارات وارده را مشکل می‌سازد. [۲]

به کارگیری موادی که در برابر خوردگی حفره‌ای مقاوم‌تر هستند، مهم‌ترین روش پیشگیری از این مشکل است. [۱] به عنوان نمونه، فولاد زنگ‌نزن مناسب برای محیط‌های شامل یون کلراید، از نوع فولاد آلیاژی ۳۱۶ است. زیرا این نوع فولاد دارای عناصر آلیاژی کروم، نیکل و مولیبدن با درصدهای به ترتیب ۱۸، ۸ و ۲ درصد است که به علت وجود عنصر مولیبدن، مقاومت به خوردگی حفره‌ای آن بهتر از فولادهای زنگ‌نزن بدون مولیبدن مانند فولاد آلیاژی ۳۰۴ است. [۲]

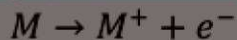
۳. خوردگی شکافی

با قرارگیری سطوح فلز در معرض محیط خورنده، خوردگی موضعی در داخل شکاف‌ها یا مناطق محافظت شده صورت می‌گیرد. به عنوان نمونه، محل‌های مناسب این نوع خوردگی می‌تواند زیر واشرها، پین‌ها، دریچه شیرها، یاتاقان‌ها، زیر رسوب‌های متخلخل و دیگر موقعیت‌های مشابه باشد و معمولاً در بسیاری از سیستم‌های آلیاژی مانند فولادهای زنگ‌نزن، آلیاژهای تیتانیوم و آلومینیوم رخ می‌دهد.

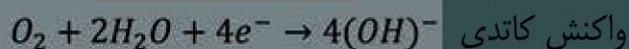
خوردگی شکافی هنگامی صورت می‌گیرد که شکاف برای ورود مایع خورنده به اندازه کافی گسترده و برای راکد نگه داشتن آن، به اندازه کافی باریک باشد. [۱]



سازوکار خوردگی شکافی تا حدودی شبیه به سازوکار خوردگی حفره‌ای است. واکنش‌های آندی و کاتدی که در سطح شکاف انجام می‌شوند، به صورت زیر هستند:

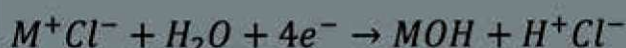


واکنش آندی



واکنش کاتدی

از آن جا که محلول موجود در شکاف را کد است، اکسیژن لازم برای واکنش کاتدی مصرف می‌شود و دیگر جایگزین نمی‌شود، اما واکنش آندی ادامه می‌یابد و غلظت بالای یون‌های فلز با بار مثبت را ایجاد می‌کند. برای موازنه بار، یون‌های منفی (عمدتاً یون‌های کلراید) به داخل شکاف حرکت می‌کنند و M^+Cl^- شکل می‌گیرد. واکنش این ترکیب یونی با آب و الکترون‌های حاصل از واکنش آندی، موجب تشکیل هیدروکسید فلز و اسید می‌شود که به صورت زیر اتفاق می‌افتد:



تولید تدریجی این اسید باعث می‌شود که لایه نازک تأثیرپذیر، مورد تهاجم خوردگی قرار بگیرد. [۲]

برای جلوگیری از خوردگی شکافی اقدامات زیر می‌تواند مفید باشد:

- استفاده از جوشکاری برای اتصال قطعات
- استفاده از واشرهای غیرفلزی با قابلیت جذب‌کنندگی بسیار پایین [۱]

۴. خوردگی بین‌دانه‌ای

خوردگی بین‌دانه‌ای هنگامی رخ می‌دهد که رسوب یا جدایش فاز دومی به صورت موضعی در مرز دانه‌ها صورت گیرد. این نوع خوردگی می‌تواند در مواردی مانند خوردگی حفره‌ای خسارات غیرمنتظره را به همراه داشته باشد. شرط انجام این نوع خوردگی وجود اختلاف پتانسیل الکتروشیمیایی زیاد بین مرز دانه‌ها و دانه‌هاست. آلیاژهای آلومینیوم با استحکام بسیار بالا و تعدادی از آلیاژهای مس که شامل فازهای رسوبی در مرز دانه‌ها برای افزایش استحکام هستند، می‌توانند تحت شرایط معینی برای خوردگی بین‌دانه‌ای مستعد باشند. همچنین فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی که در محدوده‌ی $480^\circ C$ تا $780^\circ C$ حرارت داده شده و سپس به آرامی سرد می‌گردند نیز مستعد این نوع خوردگی هستند؛ به طوری که در این محدوده حرارتی، کاربید کروم در مرز دانه‌ها رسوب می‌کند و از مقدار کروم در نقاط مجاور مرز دانه‌ها کاسته می‌شود؛ بنابراین در این مواضع با ایجاد آند واکنش خوردگی انجام شده و در نهایت منجر به شکست می‌شود. [۲]

برای جلوگیری از این نوع خوردگی می‌توان روش‌های زیر را پیشنهاد داد:

- می‌توان مقدار کربن فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی را به کمتر از 0.03% کاهش داد. مانند آلیاژ $I304$ که دارای حساسیت کمتری نسبت به گرما یا جوشکاری در محدوده دمایی ذکر شده هستند.
- استفاده از عناصری مانند Ti و Nb که تمایل بیشتری برای ترکیب با کربن و تشکیل کاربید دارند؛ این عناصر مقدار کربن را کاهش داده و از رسوب کاربید کروم جلوگیری می‌کنند. [۱]

۵. ترک خوردگی تنش

ترک ناشی از خوردگی تنش، از تأثیر همزمان تنش‌های مکانیکی و فرآیندهای خوردگی روی فلز حاصل می‌شود. این تنش‌های مکانیکی می‌توانند ناشی از تنش‌های خارجی یا تنش‌های باقی‌مانده باشند. این نوع شکست، به اصطلاح ترک خوردگی تنش شناخته شده که اغلب به اختصار SCC بیان می‌شود.

SCC شکلی پنهانی از خوردگی است؛ چرا که این نوع خوردگی، سبب از دست رفتن قسمتی از فلز شده و استحکام مکانیکی آن را کاهش می‌دهد؛ اما این تخریب در روش‌های معمول بازرسی قابل تشخیص نبوده و شکست مکانیکی فاجعه‌بار و سریع اجزاء و ساختارها را به همراه دارد. از جمله این فاجعه‌ها می‌توان به گسیختگی لوله‌های انتقال گاز فشار بالا، انفجار دیگ‌های بخار و تخریب نیروگاه‌ها و پالایشگاه‌ها اشاره کرد. [۳]

معمولاً آلیاژها بیشتر از فلزات مستعد این نوع خوردگی هستند و حتی با وجود مقدار نسبتاً جزئی از عوامل شیمیایی موثر مانند کلر در محیط رخ دهد. [۴]

رخ دادن SCC به حضور همزمان سه عامل بستگی دارد:

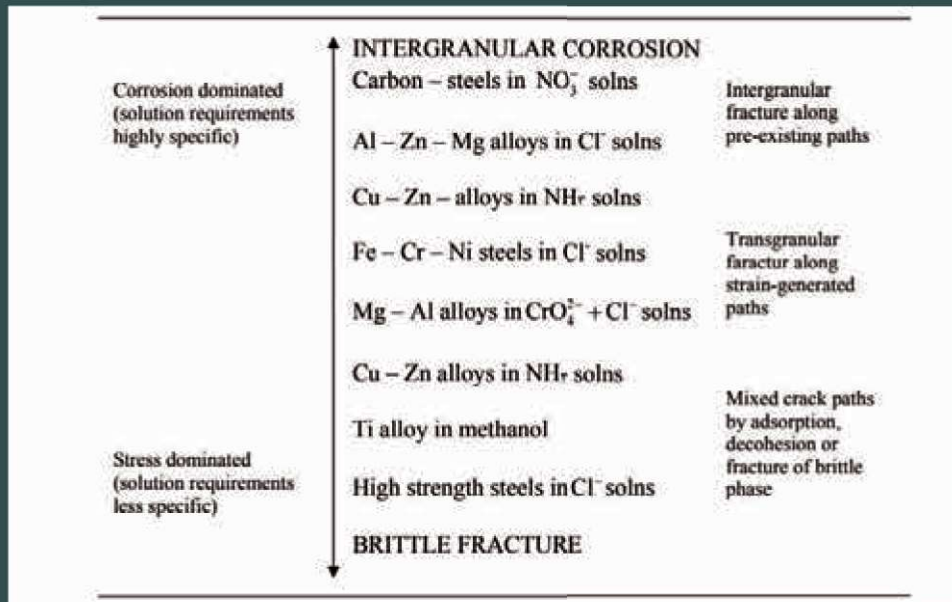
- یک ماده مستعد

- محیطی که موجب انجام SCC برای آن ماده می‌شود

- تنش کششی کافی

در نتیجه SCC نسبتاً به ندرت اتفاق می‌افتد، اما شکست ناشی از آن می‌تواند بسیار پرهزینه و مخرب باشد. [۵]

SCC توسط ترکیبی از عوامل مختلف رخ می‌دهد. در جدول ۱، فهرستی از آلیاژها و محیط‌های ایجادکننده SCC آمده‌است. این جدول سیستم‌های اثبات‌شده و مهم را برای مشکلات SCC بیان می‌کند. [۳]



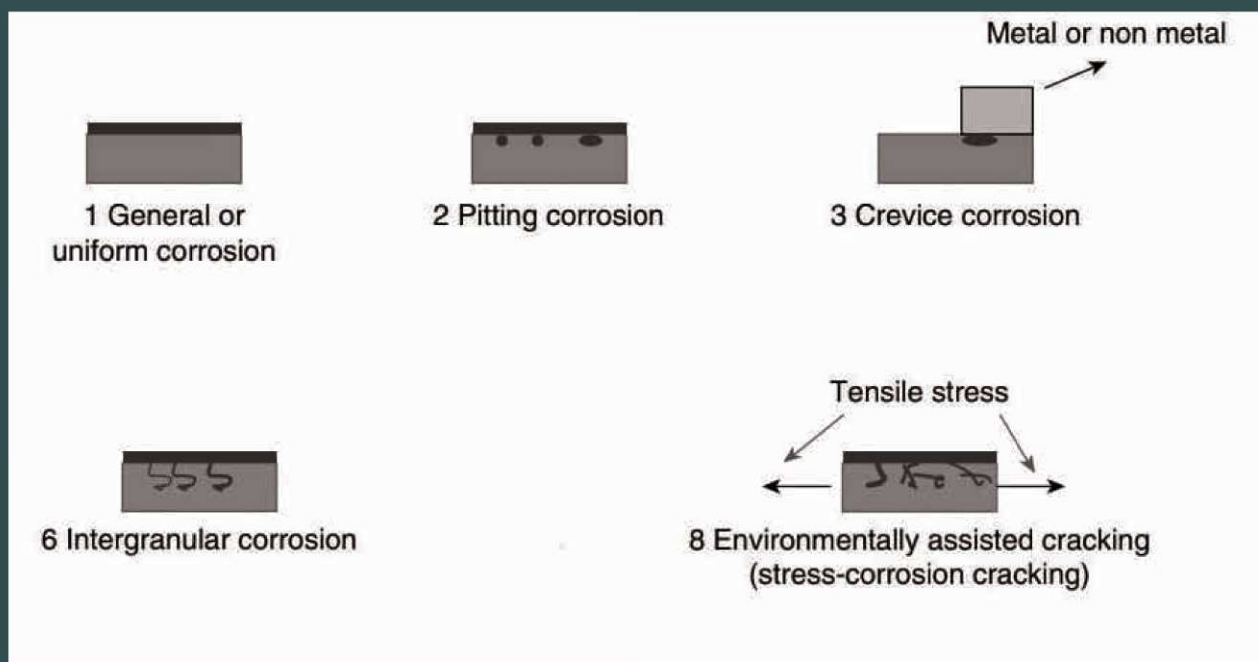
جدول ۱- فهرستی از آلیاژها و محیط‌های ایجادکننده SCC [۳]



نخستین قدم برای جلوگیری از این نوع خوردگی، انتخاب مواد مناسب است. با انتخاب ماده‌ای که خود حساس به SCC نباشد و با پردازش صحیح آن می‌توان از مشکلات SCC پرهیز کرد اما این کار همیشه ساده نیست؛ برخی محیط‌ها مانند آب با دمای بالا بسیار خورنده هستند و موجب SCC در بیشتر مواد می‌شوند. روش دیگر برای جلوگیری از SCC، حذف و یا کاهش تنش تا کمتر از حد تنش بحرانی SCC است. حذف تنش‌های اصلی امکان‌پذیر نیست اما امکان حذف تنش‌های باقی‌مانده‌ای که منجر به ترک می‌شوند، وجود دارد.

کنترل محیط و عوامل آن بیشترین تأثیر را در کنترل SCC دارد. اگر در سراسر محیط گونه‌های فعال وجود داشته باشد، باید آن‌ها را حذف کرد اما این کار نیز بسیار مشکل است. یکی از روش‌های حفاظت از گونه‌های فعال، پوشش‌های فلزی است. این پوشش‌ها، فلز را از محیط‌های فعال ایزوله کرده و مانع SCC می‌شود اما در مواقعی همین کار باعث ایجاد مشکلات مخرب‌تری می‌شود. [۵]

شکل ۱ انواع خوردگی ذکر شده در بالا را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.



شکل ۱- طرح کلی برای اشکال مختلف خوردگی بر روی فلزات / آلیاژها [۶]

۱. درجه حرارت

مانند هر واکنش دیگری، افزایش دما باعث افزایش سرعت خوردگی می‌شود. حتی در یک قطعه معین، قسمتی که دارای دمای بالاتری است نسبت به سایر نقاط مستعدتر برای خوردگی است.

۲. اختلاف پتانسیل

با قرار گرفتن فلزات غیرهم‌جنس و متصل به هم در یک محیط الکترولیت مشترک، به علت اختلاف پتانسیل موجود بین الکترودها، فلزی که دارای پتانسیل الکتروشیمیایی کمتری است، به عنوان آند خورده شده و فلز دیگر حفاظت کاتدی می‌شود.

۳. شرایط سطحی و ناخالصی‌های محیطی

سرعت خوردگی در سطوح صیقلی و تمیز فلزات نسبت به سطوح زبر و خشن به شدت تغییر می‌کند، به طوری که در سطوح صاف سرعت خوردگی کمتر است. وجود ناخالصی‌ها هم در محیط عامل بسیار مهمی است و اثرات گوناگونی روی نحوه و میزان خوردگی می‌گذارد.

۴. تشعشع

تاکنون در این زمینه بررسی‌های بسیار کمی صورت گرفته است اما طبق آزمایش‌های به عمل آمده، در حضور تشعشع میزان و شدت خوردگی افزایش می‌یابد.

۵. زمان

در برخی حالات بین زمان و میزان خوردگی رابطه‌ای خطی وجود دارد. معمولاً خوردگی با گذر زمان افزایش می‌یابد اما در شرایطی نیز کاهش میزان خوردگی مشاهده شده است.

۶. تنش

میزان تخریب مواد در قطعاتی که تحت تنش کششی و در معرض محیط‌های خورنده قرار می‌گیرند، شدیدتر می‌گردد.

۷. فشار اکسیژن و اختلاف در pH

فشار اکسیژن و pH به علت ایجاد مناطق آندی و کاتدی، عوامل مؤثری در واکنش‌های شیمیایی و اکسیداسیون مواد هستند.

۸. خواص فلزی

خواص و مشخصات مواد نقش بسیار مهمی در خوردگی و میزان آن دارد. مرزدانه‌ها، ساختمان بلوری، روش‌های ریخته‌گری، عملیات حرارتی، خواص مکانیکی و ترکیب شیمیایی از عوامل مهم و مؤثری است که باید مدنظر قرار گیرد. [۷] عملیات حرارتی با تغییر خواص مواد، رفتار خوردگی را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد.

[۱] K. p. balan, «corrosion,» Elsevier, 2018.

[۲] س. ح. تویسرکانی، اصول علم و مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۷.

[۳] L. L. Shreir, «Stress-corrosion Cracking of Ferritic Steels,» in Corrosion, Elsevier: Newnes-Butterworths, 2014.

[۴] B. B. F, Stress Corrosion Cracking of Metals-A State of the Art, ASTM International, 1972, p.1972.

[۵] T. S. V S Raja, Stress Corrosion Cracking, Elsevier, 2011.

[۶] J. S.-S. P. Zarras, «an introduction,» in Corrosion processes and strategies for prevention, elsevier, 2014, pp.3-28.

[۷] P. R. Roberge, Corrosion Engineering: Principle and Practice, McGraw-Hill Professional, 2008.